ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249238

การขุนรังกะสีนมอุ่นร้อนโดยการเคลือบชั้นของฟิล์มผิวกลัวน้ำ

นายรัฐชนน์ สงวนหมู่

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249238

การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า

นายรัญชน์ สงวนหมู่

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5 1 7 0 4 4 2 7 2 1

HOT-DIP GALVANIZATION BY PRE-COATING OF ELECTRODEPOSITED NICKEL INTERLAYER

Mr. Run Sa-nguanmoo

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า
โดย	นาย รัญชน์ สงวนหมู่
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ

รัญชน์ สงวนหมู่ : การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า. (HOT-DIP GALVANIZATION BY PRE-COATING OF ELECTRODEPOSITED NICKEL INTERLAYER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, 86 หน้า.

249238

กระบวนการชุบสังกะสีโดยวิธีที่เหล็กถูกชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและจุ่มร้อนลงในเบ้าหลอมสังกะสีหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 450°C ถูกตรวจสอบ เนื่องจากเป็นหนทางที่อาจเกิดขึ้นได้ในการบรรเทาปัญหาการโตเกินไปของชั้นเคลือบสังกะสีและช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กชุบสังกะสี อิทธิพลของตัวแปรในการผลิตซึ่งประกอบด้วยรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้า, ระยะเวลาในการชุบไฟฟ้าและจุ่มร้อนที่มีผลต่อการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและเฟสโครงสร้างและสอดคล้องกับพฤติกรรมการกัดกร่อนและสมบัติการยึดเกาะที่มีต่อเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำได้ถูกสำรวจและวิเคราะห์ ชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีที่เตรียมด้วยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าสามารถผลิตให้โครงสร้างมีความสม่ำเสมอ ปราศจากช่องว่างโดยรูปแบบการจ่ายกระแสแบบพัลส์ในการชุบนิกเกิล โครงสร้างจุลภาคทั่วไปของเหล็กชุบสังกะสีชนิดนี้ประกอบด้วยชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียตของสังกะสี-เหล็กที่ขัดเจนสองชั้นและชั้นนิกเกิลที่หลงเหลือจากการจุ่มร้อน ความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบเหล่านี้สามารถมั่นใจได้โดยการเตรียมชั้นรองพื้นนิกเกิลที่มีความหนาที่เหมาะสมและสัมพันธ์กับระยะเวลาในการจุ่มร้อน การทดสอบการดัดโค้งแสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบเหล่านี้มีการยึดเกาะที่ดีกับเนื้อพื้นของเหล็กเมื่อเทียบกับชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิม ผลจากการทดสอบความคงทนต่อไอเกลือแสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบที่มีชั้นรองพื้นนิกเกิลมีความต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นอย่างน้อย 2 เท่าเมื่อเทียบกับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมถึงแม้ว่าชั้นเคลือบจะมีความบางกว่า 3 เท่า การศึกษาโพลาไรเซชัน-โพเทนเชียลเสนอแนะว่าการปรับปรุงสมรรถนะการกัดกร่อนเป็นผลจากอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่สูงของชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียตของสังกะสี-เหล็กที่เกิดขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2553.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5170442721 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : Hot-dip galvanization / Electrodeposited film / Nickel / Zinc / Microstructure / Corrosion

RUN SA-NGUANMOO : HOT-DIP GALVANIZATION BY PRE-COATING OF ELECTRODEPOSITED NICKEL INTERLAYER. THESIS ADVISOR : YUTTANANT BOONYONGMANEERAT, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : ASST. PROF. EKASIT NISARATANAPORN, Ph.D., 86 pp.

249238

The galvanizing process whereby steel is electrodeposited with nickel and hot-dipped in a molten zinc bath at 450°C is investigated as a potential route to mitigate the zinc-coating overgrowth problem and to improve the corrosion properties of the galvanized steels. The influences of processing parameters, including electrodeposited current waveforms, and the electroplating and galvanizing durations on the evolutions of microstructure and phase structures, the corresponding corrosion behaviors, and the adhesion properties of the galvanized low-carbon steels are explored and analyzed. Galvanized coatings prepared with the electrodeposition of nickel interlayer can be produced with uniform, void-free structure using a pulse-current waveform upon nickel deposition. A typical microstructure of this type of galvanized steels consists of two apparent zinc-nickel intermediate layers and a nickel layer that survives the galvanization. The uniformity of these layers can be ensured by providing a nickel pre-coating of suitable thickness in relation to the hot dip duration. The bending test demonstrates that such coating exhibits superior adhesion as compared to the coating of conventional type. The results from the salt spray tests demonstrate that galvanized coating with nickel precoating exhibits at least 2 times more enhanced corrosion resistance than the conventionally-galvanized steel, even though the thickness of the coating is 3 times smaller. The polarization potential study suggests that such improved corrosion performance is attributed to a low corrosion rate and a high corrosion potential of the Zn-Ni intermediate layers thus formed.

Department : Metallurgical Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Metallurgical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2010 Co-Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ของที่อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทั้งสองท่านคืออาจารย์ ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร ที่กรุณาอบรมให้ความรู้ ให้คำแนะนำ, ข้อคิดเห็นและสร้างเสริมประสบการณ์ในการทำงานอันมีค่ายิ่งให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล และอาจารย์ ดร.ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังขอขอบพระคุณกลุ่มงานวิจัย PORETEGE แห่งสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยคุณกนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ, คุณปราณี รัตนวลีดิโรจน์, คุณสวลี เสนาพิทักษ์ และคุณอดิศักดิ์ ถือพลอย สำหรับความช่วยเหลือ, ความรู้และการให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ในส่วนของการศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน ขอขอบพระคุณคุณจุมพฏ วานิชสัมพันธ์ สำหรับการอบรมในส่วนของการเตรียมผิวชิ้นงาน จนงานสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยสำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยตามสัญญา 022/2552

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สำหรับพระคุณอันล้นพ้นสำหรับโอกาสในการศึกษา กำลังใจและกำลังสนับสนุนที่ดีตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 4

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น 5

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5

2.1.1 สังกะสี 5

2.1.2 นิกเกิล 6

2.1.3 แผนภูมิสมดุลของเหล็กกับสังกะสี 7

2.1.4 การเกิดเฟสของเหล็กและสังกะสี 10

2.1.5 กระบวนการชุบสังกะสีด้วยวิธีการจุ่มร้อน 12

2.1.6 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า 14

2.1.7 การตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี 16

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 19

3 ระเบียบวิธีวิจัย 28

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย 28

3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย 29

หน้า

4 ผลการการทดลองและการอภิปราย.....33
4.1 ผลของตัวแปรในการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า..... 33
4.2 การศึกษาการพัฒนาของโครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เกิดขึ้น.....35
4.2.1 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไป ตามความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิล..... 36
4.2.2 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไปตาม ระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน..... 43
4.3 การทดสอบการดัดโค้ง T-bend flexibility test..... 51
4.4 การศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน.....57
4.4.1 การทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ (Salt spray testing)..... 57
4.4.2 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยเทคนิกโพเทนชิโอไดนามิกส์ (Potentiodynamic)..... 62
4.4.3 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของแต่ละชั้นเคลือบโดยเทคนิค กัลวาโนสแตติกและโพเทนชิโอไดนามิกส์ (Galvanostatic and Potentiodynamic)..... 64

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 69

รายการอ้างอิง.....71

ภาคผนวก..... 74
ภาคผนวก ก..... 75
ภาคผนวก ข.....76
ภาคผนวก ค.....84

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 86

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของเฟสที่เกิดในโลหะผสมของเหล็กและสังกะสี..... 9
ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบของเหล็กกัลป์วาไนซ์โดยวิธีการจุ่มร้อนโดยที่มีและไม่มีนิกเกิล
เป็นชั้นรองพื้น..... 20
ตารางที่ 2.3 การตรวจสอบด้วยตาเปล่าของแผ่นเหล็กกัลป์วาไนซ์ที่ผ่านการทดสอบ
ด้วยการพ่นละอองเกลือ..... 20
ตารางที่ 2.4 ชนิดของน้ำยาประสาน..... 21
ตารางที่ 2.5 ขอบเขตของตัวแปรในการชุบไฟฟ้ากระแสพัลส์ในงานวิจัยของ
A.M. El-Sherik et. al..... 25
ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น..... 33
ตารางที่ 4.2 เอกลักษณ์ของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิล
ด้วยไฟฟ้าที่ระยะเวลาในการจุ่มร้อน 1 นาที..... 40
ตารางที่ 4.3 เอกลักษณ์ของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิล
ด้วยไฟฟ้าที่ความหนา H2..... 45
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลา, (n)และค่าคงที่ของอัตราในการโต, (K)
ของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิล
ด้วยไฟฟ้า..... 49
ตารางที่ 4.5 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของ
กราฟโพลาไรเซชันจากภาพที่ 4.24..... 64
ตารางที่ 4.6 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของ
กราฟโพลาไรเซชันจากภาพที่ 4.27..... 68

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 แผนผังระบบสององค์ประกอบของเหล็กและสังกะสีในบริเวณที่มีปริมาณของสังกะสีเป็นส่วนมาก 8
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างระดับจุลภาคของชั้นเคลือบสังกะสี ที่เกิดขึ้นหลังจากการจุ่มร้อนเป็นเวลา 300 วินาที ณ อุณหภูมิ 450 oC (1) เฟสแกมมา(Γ), (2) เฟสเดลตา (δ), (3) เฟสซีตา (ζ) 10
ภาพที่ 2.3 แผนผังของการเกิดชั้นเฟสของเหล็กและสังกะสีในเตาหลอมกัลวาไนซ์ 0.00 wt% อะลูมิเนียม-สังกะสี, t0 หมายถึงระยะเวลาเริ่มต้นและการพัฒนาของชั้นเฟสเกิดขึ้นตามเวลา t0, t1, t2, t3 และ t4 ตามลำดับ 11
ภาพที่ 2.4 แผนผังของการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า 14
ภาพที่ 2.5 แผนผังอย่างง่ายของเครื่องโพเทนชิโอสแตทที่ใช้วัดเส้นโพลาไรเซชัน 17
ภาพที่ 2.6 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr})และ อัตราการกัดกร่อน (I_{corr}) จากเส้นโพลาไรเซชัน 18
ภาพที่ 2.7 แสดงส่วนต่างๆ ของเส้นโพลาไรเซชัน 19
ภาพที่ 2.8 ภาพถ่ายจาก SEM ของชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยาประสาน $CdCl_2$ ที่ละลายในน้ำและน้ำยาประสานทั่วไป (a) $CdCl_2$ 30% ในน้ำ, (b) $CdCl_2$ 2.5% ในน้ำยาประสานทั่วไป 22
ภาพที่ 2.9 ภาพถ่ายจาก SEM ของชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยาประสาน $NiCl_2$ ที่ละลายในน้ำและน้ำยาประสานทั่วไป (a) $NiCl_2$ 50% (b) $NiCl_2$ 10% ในน้ำยาประสานทั่วไป 22
ภาพที่ 2.10 ภาพถ่ายจาก SEM ของชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยาประสาน NiCl2 ที่ละลายในน้ำ (a) บริเวณที่มีเฟสซีตาผลึกเล็กกว่า (b) บริเวณที่มีเฟสซีตาผลึกใหญ่กว่า 22
ภาพที่ 2.11 ปริมาณของซิลิกอนเทียบกับความหนาของชั้นอัลลอยที่ได้จากการจุ่มร้อนที่อุณหภูมิ 450 °C โดยทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการจุ่มร้อน (a) ปราศจากชั้นของนิกเกิล (b) ทำการชุบนิกเกิลที่ความหนา 3 ไมครอนก่อนทำการจุ่มร้อน 23

หน้า

ภาพที่ 2.12 อิทธิพลของ T_{on} บนโครงสร้างจุลภาคที่พื้นผิวของนิกเกิลที่มีความหนา 300 μmโดยที่มี T_{off} คงที่ 15 ms ความหนาแน่นของกระแสคงที่ 400 mA/cm^2 a) T_{on}=1 ms, b) T_{on}=3 ms, c) T_{on}=5 ms, d) T_{on}=8 ms..... 26

ภาพที่ 2.13 อิทธิพลของ T_{off} บนโครงสร้างจุลภาคที่พื้นผิวของนิกเกิลที่มีความหนา 300 μmโดยที่มี T_{on} คงที่ 1 ms ความหนาแน่นของกระแสคงที่ 400 mA/cm^2 a) T_{off}=5 ms, b) T_{off}=15 ms, c) T_{off}=22 ms, d) T_{off}=32 ms, e) T_{off}=42 ms..... 27

ภาพที่ 4.1 รูปแบบการจ่ายกระแสในการชุบนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้า ก) กระแสต่อเนื่อง, ข) กระแสพัลส์..... 33

ภาพที่ 4.2 แสดงตัวอย่างของชิ้นงาน ก) แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น, ข) แผ่นเหล็กเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า, ค) แผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า.....34

ภาพที่ 4.3 ภาพตัดขวางของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยชั้นรองพื้นนิกเกิลผลิตจากการชุบด้วยไฟฟ้า ก) กระแสต่อเนื่อง และ ข) กระแสพัลส์..... 35

ภาพที่ 4.4 ภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กโดยการเคลือบนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้าที่ความหนาโดยประมาณ ก) 3 μm (H1), ข) 6 μm (H2), ค) 9 μm (H3) และ ง) 12 μm (H4)..... 37

ภาพที่ 4.5 ความหนาเฉลี่ยของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ผลิตด้วยไฟฟ้ากระแสพัลส์..... 37

ภาพที่ 4.6 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ในระยะเวลาในการจุ่มร้อน 1 นาที โดยที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลมีความหนา ก) H1, ข) H2, ค) H3 และ ง) H4.....38

ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน H4-1m โดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงที่กำลังขยาย 2000 เท่า..... 40

ภาพที่ 4.8 แผนภาพเฟส 3 องค์ประกอบของสังกะสี นิกเกิลและเหล็กที่อุณหภูมิ 450 °C..... 41

หน้า

ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน H1-1m โดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ในกรณีที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลเกิดการแพร่ไปสู่สังกะสีหลอมเหลวจนหมดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงที่กำลังขยาย 1000 เท่า 42

ภาพที่ 4.10 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่ความหนา H1 ถึง H4 และจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 1 นาที 43

ภาพที่ 4.11 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ในระยะเวลาในการจุ่มร้อน ก)10 วินาที, ข) 1 นาที, ค) 3 นาที และ ง) 6 นาที โดยที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลมีความหนา H2 44

ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน H2-6m โดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ในกรณีที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลเกิดการแพร่ไปสู่สังกะสีหลอมเหลวจนหมดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงที่กำลังขยาย 1000 เท่า 45

ภาพที่ 4.13 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการจุ่มร้อนในช่วง 10 วินาทีถึง 6 นาที 47

ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบต่อระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน 48

ภาพที่ 4.15 ความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน 50

ภาพที่ 4.16 ลักษะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมที่จุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 1 นาที ก) ชิ้นงานก่อนทดสอบการดัดโค้ง ข) ชิ้นงานภายหลังทดสอบการดัดโค้ง ค) ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศ์แบบแสง 51

ภาพที่ 4.17 ลักษะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H4-1m ก) ชิ้นงานก่อนทดสอบการดัดโค้ง ข) ชิ้นงานภายหลังทดสอบการดัดโค้ง ค) ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศ์แบบแสง 52

หน้า

ภาพที่ 4.18 ภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมที่จุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาทีหลังจากดัดโค้งทำมุม 90 องศากับระนาบเดิม ก) และ ข) ส่วนที่ได้รับแรงอัด ค) และ ง) ส่วนที่ได้รับแรงดึง..... 53
ภาพที่ 4.19 ภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมที่จุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาทีหลังจากดัดโค้งคืนสู่ตำแหน่งเดิม ก)และข)ส่วนที่ได้รับแรงอัด ค) และ ง) ส่วนที่ได้รับแรงดึง..... 54
ภาพที่ 4.20 ภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H4-1m ภายหลังจากดัดโค้งทำมุม 90 องศากับระนาบเดิม ก)และข)ส่วนที่ได้รับแรงอัด ค) และ ง) ส่วนที่ได้รับแรงดึง..... 56
ภาพที่ 4.21 ภาพตัดขวางของชิ้นงานชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H4-1m ภายหลังจากดัดโค้งคืนสู่ตำแหน่งเดิม ก)และข)ส่วนที่ได้รับแรงอัด ค) และ ง) ส่วนที่ได้รับแรงดึง..... 57
ภาพที่ 4.22 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมและโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H1, H2, H3 และ H4 โดยกำหนดระยะเวลาในการชุบสังกะสี 1 นาที ภายหลังจากการทดสอบความคงทนต่อไอเกลือที่ระยะเวลา ก) 0, ข) 100, ค) 550, ง)1100 และ จ) 1400 ชั่วโมง..... 58
ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสนิมเหล็กต่อระยะเวลาในการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและโดยวิธีดั้งเดิม..... 61
ภาพที่ 4.24 กราฟโพลาไรเซชันของชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์..... 63
ภาพที่ 4.25 กราฟ potential-time plot ของชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ด้วยเทคนิคกัลวาโนสแตติคในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก โดยมีค่ากระแสคงที่ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร..... 65

หน้า

ภาพที่ 4.26 กราฟ potential-time plot ของชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ด้วยเทคนิคกัลวาโนสแตติคในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก โดยมีค่ากระแสคงที่ที่ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรเป็นระยะเวลาต่างๆ 66
ภาพที่ 4.27 กราฟโพลาไรเซชันของชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ด้วยเทคนิคโพเทนซิโอไดนามิกส์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก (ดูภาพที่ 4.26 ประกอบ) 68
ภาพที่ ข.1 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H2-10s 76
ภาพที่ ข.2 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H2-10s 76
ภาพที่ ข.3 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H1-1m 77
ภาพที่ ข.4 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H1-1m 77
ภาพที่ ข.5 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H2-1m 78
ภาพที่ ข.6 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H2-1m 78
ภาพที่ ข.7 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H3-1m 79
ภาพที่ ข.8 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H3-1m 79
ภาพที่ ข.9 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H4-1m 80
ภาพที่ ข.10 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H4-1m 80
ภาพที่ ข.11 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H2-3m 81

หน้า

ภาพที่ ข.12 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและ
การวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจาย
พลังงานของชิ้นงาน H2-3m..... 81
ภาพที่ ข.13 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H2-6m..... 82
ภาพที่ ข.14 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและ
การวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจาย
พลังงานของชิ้นงาน H2-6m..... 82
ภาพที่ ข.15 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสี
แบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่องที่
ระยะเวลาในการจุ่มร้อน 1นาที..... 83
ภาพที่ ค.1 จำลองการแพร่ของชั้นรองนิกเกิลตามระยะเวลาในการจุ่มร้อนที่
เปลี่ยนแปลงไปจาก t1ถึง t3..... 85